

APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AUTOMATIZADA Y DE TÉCNICAS DE ILUMINACIÓN CON HERRAMIENTAS SIG PARA LA VISUALIZACIÓN Y EL ANÁLISIS DE UNA PIEDRA CON RELIEVES ANTROPOMORFOS

APPLICATION OF AUTOMATED PHOTOGRAMMETRY AND LIGHTING TECHNIQUES WITH GIS TOOLS FOR VISUALISATION AND ANALYSIS OF A SLAB WITH ANTHROPOMORPHOUS RELIEFS

David Torregrosa-Fuentes^{a,*} , Yolanda Spairani Berrio^a , José Antonio Huesca Tortosa^a ,
Jaime Cuevas González^b , Adrián José Torregrosa Fuentes^c 

^a Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Alicante. Campus de San Vicente del Raspeig, 03690, Alicante, Spain. info@davidtorregrosa.com; yolanda.spairani@ua.es; ja.huesca@ua.es

^b Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante. Campus de San Vicente del Raspeig, 03690 Alicante, Spain. jaimed.cuevas@ua.es

^c Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad Miguel Hernández. Av. Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante), Spain. ajtorregrosa@umh.es

Lo más destacado:

- Representación y análisis de relieves y grabados sobre elementos pétreos mediante virtualización con fotogrametría y obtención de modelos digitales.
- Aplicación de herramientas de visualización y SIG para el estudio de microtopografías en patrimonio cultural de pequeño tamaño.
- Necesidad de desarrollar metodologías para el estudio y puesta en valor del patrimonio así como la reinterpretación del patrimonio ya estudiado.

Extended Abstract:

We present a methodological approach for the representation, visualisation and analysis of three-dimensional (3D) models of meaningful details in stone reliefs provided by digital documentation tools and subsequent processing. For this aim, anthropomorphous shapes engraved on a flat stone slab found in Sierra de Fontcalent (Alicante) are studied. The object under consideration was located near two archaeological sites, *Cova del Fum* –a cave with presence of the Chalcolithic material (López, 2010)– and the archaeological site of Fontcalent, with remains from different phases of occupation spanning from 7th-6th BC to the 20th century (Ximénez, 2012).

In the last few years, the use of digital tools provided by new technologies and software development has left traditional work methodology behind (De Reu et al., 2014) while enabling the development of new approaches to both minimise heritage alteration and provide objective and accurate information (Lopez-Menchero, Marchante, Vincent, Cárdenas, & Onrubia, 2017). 3D documentation allows recording of cultural heritage at a reasonable cost with precision and quality through digital photography and SfM (Structure from Motion) photogrammetry with specialised software (De Reu et al., 2013).

In this project, recording and documentation with digital photography and automated photogrammetric techniques are applied to the Fontcalent stone slab for its digitisation and subsequent 3D representation. From the resulting model, a two-folded line of study is obtained. On the one hand, a Digital Elevation Model (DEM) is generated to study the microtopographies of the stone with geographic analysis techniques provided by Geographic Information Systems (GIS) from different lighting conditions and surface reflections, which are calculated by hillshading or LRM (Local Relief Model) for the interpretation of the object (Carrero-Pazos, Vilas, Romaní, & Rodríguez, 2014; Gawior, Rutkiewicz, Malik & Wistuba, 2017). On the other hand, from both the 3D model and the point cloud, the study is completed with the application of the methods of analysis and visualisation based on the Morphological Residue Model (MRM) which stands out every single detail of the surface morphology of the object (Caninas, Pires, Henriques, & Chambino, 2016; Correia, Pires, & Sousa, 2014). Further visualisations are based on Reflectance Transformation Imaging (RTI) which provides different shadows and reflections over the object from the application of a multidirectional illumination (Happa et al., 2010; Malzbender, Gelb, Wolters, & Zuckerman, 2000; Mudge et al., 2010).

* Corresponding author: David Torregrosa Fuentes, info@davidtorregrosa.com

The results thus obtained of the Fontcalent stone slab allow us to visualise several characteristic elements. The anthropomorphic figure awaking interest is also combined with the figure resulting from different visualisations applied with GIS techniques which may resemble a zoomorph. The use of visualisation techniques shown in this study has been fundamental in order to recognise the latter element. The composition reveals a zigzag line already appreciated before the study so that it is interesting to check if visualisations based on GIS techniques are able to highlight it though being shallow incisions. In our experience regarding this study, visualisation by using the hillshading technique shows a greater level of 3D detail than that provided by the application of the sky-view factor technique which offers a flattering view. However, the former technique may occasionally show shadows which hide other details, unlike the latter technique which plots the entire slab surface illuminated while differentiating the associated microtopography on the basis of its marks. The use of shaders in combination with hillshading and particularly combined with high pass filtering, contributes to improving the visualisation and accuracy of shadowed areas. As a result, we conclude that the results obtained in this work by lighting techniques with GIS add a greater level of detail in comparison to those provided by the mesh or the point cloud.

The study of the Fontcalent stone slab paves the way for two working hypotheses to be developed: on the one hand, its anthropological origin possibly related to the Chalcolithic, and on the other hand, its study as natural geological formations with ichnofossils.

The digitisation of cultural heritage with available 3D technologies should be a mandatory requirement when facing any study, analysis or intervention. With the current development of such techniques, we have verified their contribution to fundamental characteristics in the corresponding stages of visualisation and study. Thus, the proposed methodology is presented as an accurate and complete alternative for the study and analysis of the existing cultural heritage, and opens new ways for the revision, reinterpretation and revaluation of the previously evaluated heritage through traditional techniques.

Key words: cultural heritage; digital photography; Structure from Motion (SfM) photogrammetry; 3D modelling; point clouds; Geographic Information Systems (GIS)

Resumen:

Este trabajo tiene por objetivo presentar una aproximación metodológica para la representación, visualización y análisis de modelos tridimensionales (3D) de relieves y detalles significativos sobre piedra a partir de la aplicación de herramientas de documentación digital y su correspondiente procesado. Para ello se toma como objeto de estudio unas figuras antropomorfas que aparecen sobre una piedra caliza en forma de lasca plana y de espesor constante hallada en la Sierra de Fontcalent (Alicante). Sobre ella se aplican a una escala de objeto, técnicas de documentación y registro con fotogrametría mediante fotografía digital y técnicas SfM (*Structure from Motion*) para su digitalización y posterior representación en 3D. Del modelo resultante se genera un MDE (Modelo Digital de Elevación) para estudiar las microtopografías de la pieza, a través de visualizaciones topográficas obtenidas mediante herramientas de análisis geográfico que nos proporcionan los programas SIG (Sistemas de Información Geográfica) a partir de distintas condiciones de iluminación y reflejo de las superficies que proporcionan técnicas como el sombreado (*hillshading*) o el LRM (*Local Relief Model*) y que posibilitan la interpretación arqueológica del objeto bajo estudio. El estudio se completa mediante la aplicación de los métodos de análisis y visualización basados en el Modelo de Residuo Morfológico (MRM) y de RTI (*Reflectance Transformation Imaging*), respectivamente, generados ambos mediante el software Cloudcompare. De este modo, la metodología propuesta se presenta como una alternativa precisa y completa para el estudio y análisis del patrimonio cultural existente, y abre nuevas vías para la revisión, reinterpretación y revalorización del patrimonio evaluado con anterioridad mediante técnicas tradicionales.

Palabras clave: patrimonio cultural; fotografía digital; fotogrametría Structure from Motion (SfM); modelado 3D; nube de puntos; Sistemas de Información Geográfica (SIG)

1. Introducción

Situada al oeste de la ciudad de Alicante (España), se alza la Sierra de Fontcalent (Fig. 1), una alineación montañosa cercana a los 3 km de longitud y que con sus 446 m de altitud, se erige como la atalaya más alta del municipio. En su extremo noreste, aflora un manantial de aguas termales que da nombre a la sierra y desde el que surge una zona pantanosa conocida como el Saladar.

La situación privilegiada de la sierra respecto a la línea de costa unida a las características intrínsecas de la zona, han propiciado un enclave idóneo para asentamientos de población, como así lo atestiguan los yacimientos arqueológicos de distinta cronología que se han ido descubriendo.

Uno de estos asentamientos es la conocida como *Cova del Fum*, ubicada en la cara Oeste de la sierra, a mitad altura y en su zona central (Fig. 2). Los restos arqueológicos hallados durante el transcurso de las labores de prospección y excavación realizadas en el

siglo pasado permiten datar la presencia de los primeros pobladores del municipio de Alicante en ella hacia el III milenio a. C. Como recoge el inventario de yacimientos arqueológicos, dentro de los Inventarios Sectoriales de la Dirección General de Patrimonio Cultural Valenciano, la primera presencia registrada materialmente en la zona corresponde al Calcolítico (López, 2010). Los vestigios encontrados se encuentran expuestos en la actualidad en el Museo Arqueológico de Alicante (MARQ), y lo forman un conjunto de más de 2000 cuentas de collar, restos de huesos humanos, herramientas de sílex, puntas de flecha y otros adornos. Su análisis y el de los estratos donde fueron hallados permiten afirmar que el lugar fue utilizado como una especie de taller de utensilios de sílex, además de las evidencias encontradas de un uso con carácter funerario. Los enterramientos de este periodo se caracterizan por la presencia de objetos de significación religiosa como ídolos de hueso o piedra, pero de los que no hay constancia en la *Cova del Fum*, a diferencia de los hallados en otras necrópolis próximas (Hernández, 1989).



Figura 1: Mapa de situación de la Sierra de Fontcalet (Alicante).

Al noreste de la sierra se sitúa el conocido como Yacimiento de Fontcalet (Fig. 2), que incluye el manantial termal y ruinas de una ermita del s. XVIII, elevadas sobre un pequeño cerro (Ximénez, 2012). En esta zona se llevaron a cabo prospecciones y excavaciones durante la década de los sesenta por el Centro Excursionista de Alicante, saliendo a la luz el conocido grafito de Fontcalet en las proximidades de la ermita, datado de finales del siglo VI d. C. y que lo hace único por la inusual caligrafía visigótica.

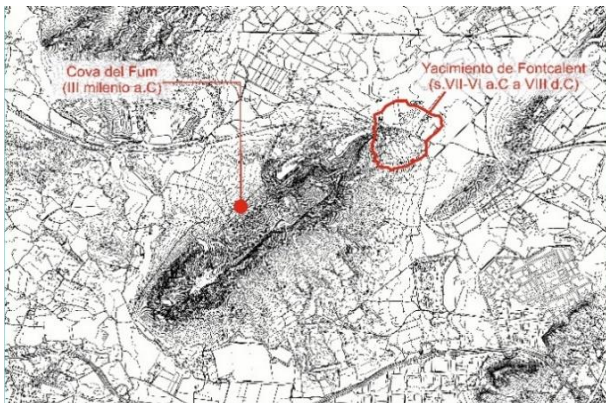


Figura 2: Ubicación de los yacimientos arqueológicos.

En 1971, encabezada por Enrique Llobregat Conesa, se realiza una campaña arqueológica en el yacimiento que no se vuelve a prospectar hasta 2008 motivada por las obras de la Línea de Alta Velocidad Madrid-Alicante. Tras la campaña de 2008, se evidencian diferentes fases de ocupación que abarcan desde los siglos XVIII-XX, segunda mitad del s. I a.C. hasta el s. V d.C., época Ibérica (ss. VI-I a.C) y durante el Bronce Final-Orientalizante, correspondiente a los siglos VII-VI a.C. (Ximénez, 2012). A estas fases habría que añadir la fase visigoda del s. VII hasta el s. VIII (Gutiérrez, 1988).

En este contexto arqueológico, aparece la piedra objeto de estudio en una zona próxima al área del Yacimiento de Fontcalet. El hallazgo llama la atención por su espesor constante de unos 2.5 cm, siendo su lado mayor de 14.5 cm, sobre la que destacan unos relieves significativos de características antropomorfas (Fig. 3).

A nivel geológico, la pieza es un fragmento de una roca sedimentaria carbonatada, homogénea sin texturas sedimentarias ni fósiles visibles. Dentro de la caracterización geológica existente en la sierra, probablemente corresponda a materiales del Jurásico de

Fontcalet, formados por calizas compactas microcristalinas bien estratificadas (Leret, Núñez, Colodrón, & Martínez, 1978).

Tras un análisis visual del objeto, aparte de la figura antropomorfa, se evidencian incisiones de poca profundidad producidas por algún elemento punzante formando una línea en zigzag (Fig. 4).

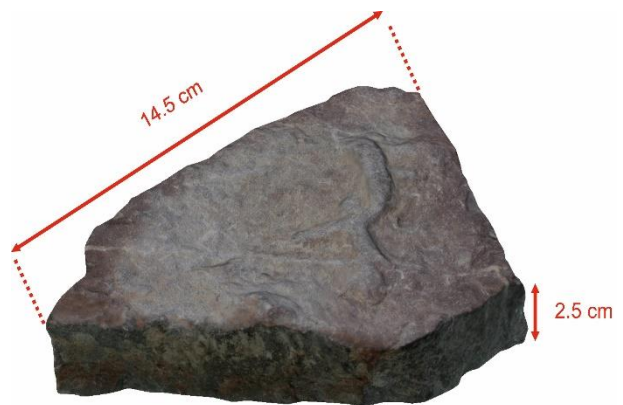


Figura 3: Piedra objeto de estudio.

2. Metodologías de visualización

El objeto del presente artículo es mostrar y desarrollar una aproximación metodológica para la visualización y análisis de piezas o elementos con singularidades formales, como petroglifos, bajorrelieves o grabados con la ayuda de las herramientas digitales.

En los últimos años, el uso de las herramientas digitales que han posibilitado las nuevas tecnologías, y sobre todo el desarrollo de software, van dejando atrás la documentación tradicional (De Reu *et al.*, 2014).

La documentación 3D mediante fotografía digital y fotogrametría SfM con programas especializados permite registrar el patrimonio cultural a un coste razonable con precisión y calidad (De Reu *et al.*, 2013).

Además, la documentación a través de herramientas digitales, no invasivas sobre el patrimonio, evita la alteración o degradación de los elementos a estudiar, como ocurre con muchos tipos de técnicas tradicionales.

Por todo ello, es de gran importancia desarrollar una metodología de trabajo que minimice la alteración del patrimonio y dé como resultado información precisa y objetiva (Lopez-Menchero, Marchante, Vincent, Cárdenas, & Onrubia, 2017).

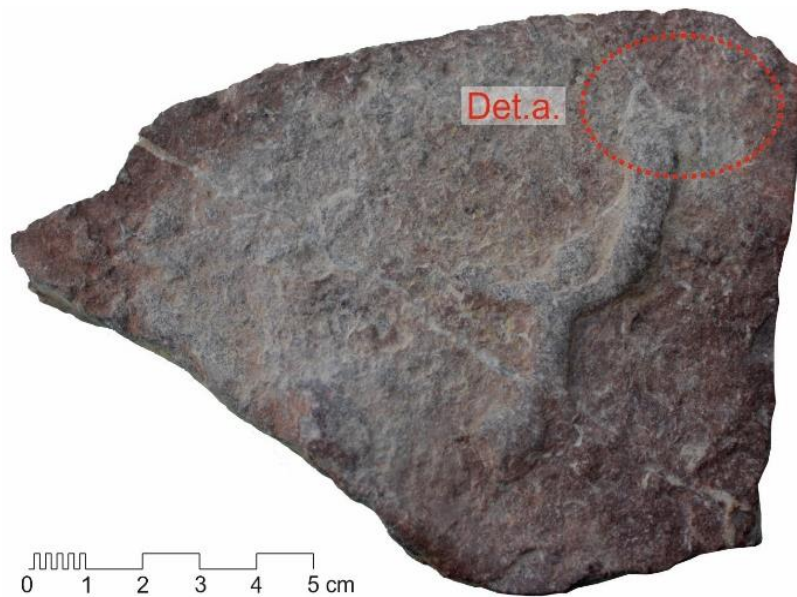


Figura 4: Relieves aparentes de la piedra y detalle de las incisiones marcadas (Det.a.).

Las investigaciones surgidas a partir de este escenario han desarrollado toda una serie de herramientas que permiten analizar el patrimonio cultural a partir de su modelo en 3D y la aplicación de técnicas de visualización. Algunos autores sitúan el origen de estas técnicas con el desarrollo de los algoritmos de Miller (1994), para destacar matices a nivel local y general de superficies (Carrero-Pazos, Vázquez-Martínez, & Vilas-Estévez, 2016).

Las líneas de trabajo que actualmente se están desarrollando por diferentes equipos de investigación se centran en dos grupos de técnicas: las que se aplican sobre modelos tridimensionales generando la visualización en 3D; y aquellas en las que a partir de un modelo tridimensional se genera un MDE y, mediante un archivo GeoTIFF, se aplican técnicas de visualización con SIG.

Entre las técnicas de visualización que se aplican sobre el modelo 3D, las últimas investigaciones se centran en tres herramientas:

- MRM (*Morphological Relief Model*). El objetivo de la técnica es resaltar formas positivas y negativas en el elemento de estudio. A partir de la nube de puntos, se genera una malla suavizada, sin detalles morfológicos, que se sustrae a la malla original a mayor detalle, resultando una visualización con los detalles de la morfología superficial del objeto (Caninas, Pires, Henriques, & Chambino, 2016; Correia, Pires, & Sousa, 2014).
- RTI (*Reflectance Transformation Imaging*). La técnica se basa en una iluminación digital interactiva con el elemento iluminado desde cualquier dirección resultando diferentes reflejos y sombras sobre la pieza (Happa et al., 2010; Malzbender, Gelb, Wolters, & Zuckerman, 2000; Mudge et al., 2010). A partir de un modelo fotogramétrico, se aplica un RTI virtual con software libre como CloudCompare o MeshLab. A la visualización RTI, se pueden aplicar diferentes tipos de sombreadores (*shader*) como el *Lit Sphere Radiance Scaling* o el *Labertian Radiance Scaling* que permite MeshLab (Carrero-Pazos et al., 2016; Carrero-Pazos, Vilas-Estévez, & Vázquez-Martínez, 2018; Lopez-Menchero et al., 2017).

- APSS (*Algebraic Point Set Surfaces*). La técnica define una superficie lisa de un conjunto de puntos que se mueven localmente ajustando por mínimos cuadrados esferas algebraicas (Guennebaud & Gross, 2007). Además, permite la coloración de los vértices de una malla o conjunto de puntos asignando colores a los vértices de la malla en función del grado de curvatura de la superficie subyacente. Estos métodos aplicados a los modelos 3D permiten una mejor visualización y comprensión de manera objetiva de los elementos sujetos a estudio (Hixon, Lipo, Hunt & Lee, 2017; Vilas-Estévez, Vázquez-Martínez, & Carrero-Pazos, 2017).

Por otro lado, las técnicas visualización con SIG a partir de datos fotogramétricos han supuesto un gran avance en la interpretación y el estudio del patrimonio, posibilitando la prospección de grandes superficies hasta el análisis de pequeñas piezas. El uso de estos SIG ha crecido de forma exponencial en los últimos años convirtiéndose en la herramienta de visualización más importante para el análisis y gestión del patrimonio cultural (Campanaro, Landeschi, Dell'Unto, & Leander, 2016; Corrales, Bermejo, & Campos, 2018; Díez, Cortell, García, & Escribá, 2017; Iturbe, Cachero, Cañal, & Martos, 2018). Las líneas de investigación con estas herramientas se centran en la creación de un MDE, generado a partir de los datos LiDAR o fotogramétricos, sobre el que se desarrollan e implementan métodos de visualización generando archivos 2D con la imagen resultado. Las técnicas más extendidas en los análisis SIG son los llamados *hillshade*, *sky-view factor*, *slopesshade* y LRM (Carrero-Pazos, Vilas, Romani, & Rodríguez, 2014; Gawior, Rutkiewicz, Malik & Wistuba, 2017). Estudios recientes aplican estas técnicas comparando los resultados a partir de datos LiDAR de distinta resolución (1 m o 5 m), con datos fotogramétricos, concluyendo que la fotogrametría de alta resolución mejora los resultados de los datos LiDAR (Fernández-Lozano & Gutiérrez-Alonso, 2016). Además, las técnicas de visualización sobre MDE como *slopesshade* y LRM, unidas a técnicas de iluminación como *sky-view factor* o *negative openness*, se presentan como las herramientas más precisas para la caracterización morfológica de

terrenos (Mayoral, Toumazet, Simon, Vautier, & Peiry, 2017; Moyes & Montgomery, 2016). En cuanto al análisis de grabados sobre pequeñas piezas, se han obtenido resultados prometedores con la combinación de determinadas herramientas 3D, dando lugar a la metodología *AsTrend*, que resalta las microtopografías de la pieza, destacando las concavidades de la superficie y mejorando la visualización de los detalles (Carrero-Pazos *et al.*, 2016).

3. Documentación y registro en 3D

El flujo de trabajo desarrollado para el estudio de la piedra de la Fontcaient (Fig. 5), se inicia con la documentación fotográfica del elemento para su digitalización y obtención de la nube de puntos en 3D con el posterior modelado en malla, mediante el software comercial Agisoft Photoscan v. 1.2.3, generando una doble vía de estudio.

Por un lado, obtenemos un MDE para trabajarlo con herramientas de visualización incorporadas en SIG, y por otro lado se realiza el estudio de la malla con el software libre CloudCompare. Para la toma de fotografías, se ha utilizado una cámara réflex Canon EOS 600D, con un objetivo estándar Canon EF-S 18-55 mm f/3.5-5.6 IS II, realizando 34 fotografías con una apertura de diafragma f/4, un tiempo de exposición de 1/400 s, una sensibilidad ISO 100 y una distancia focal de 18 mm. La cámara se ha montado sobre trípode para garantizar la mayor nitidez. Las fotografías se han realizado en condiciones de luz natural y uniforme evitando la proyección de sombras.

Una vez cargadas las fotografías en Photoscan (Fig. 6), realizamos el proceso automatizado que ofrece el programa para el alineado de las cámaras y la creación de la nube de puntos densa con sus propiedades (Fig. 7).

Por otro lado, se ha realizado el calibrado de la cámara de forma automática como permite el programa mediante el cálculo de la calibración inversa a partir de los parámetros de deformación de las imágenes. Para un

tamaño de pixel en sensor de 0.004 mm y una distancia focal de 18 mm, la Figura 8 muestra los parámetros de orientación interna calibrados: distancia principal (F), coeficientes de distorsión radial (K) y los coeficientes de distorsión tangencial (P).

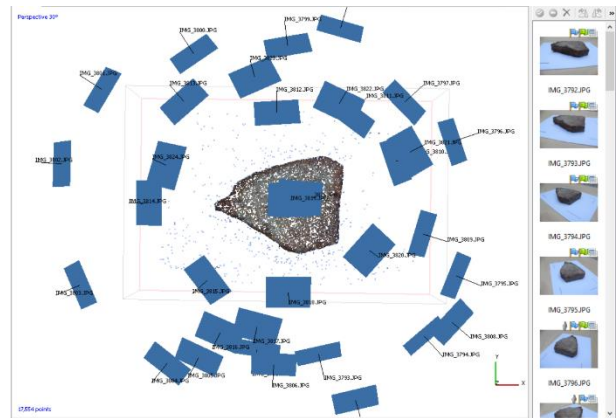


Figura 6: Fotografías cargadas y alineadas en 3D.

Property	Value
General	
Cameras	34
Aligned cameras	34
Markers	4
Coordinate system	Local Coordinates
Point Cloud	
Points	4,541 of 39,568
RMS reprojection error	0.0265686 (0.110921 pix)
Max reprojection error	0.0494376 (0.451727 pix)
Mean key point size	3.79671 pix
Effective overlap	3.35114

Figura 7: Valores y características de la nube de puntos.

Resolución	Distancia focal	Tamaño de pixel	Precalibrada
5184 x 3456	18 mm	4.4 x 4.4 micras	No
Tipo: Cuadro			
Fx:	4191.34	Cx:	2650.78
Fy:	4191.34	Cy:	1801.33
K1:	-0.190597	P1:	0.000939707
K2:	0.163126	P2:	6.26562e-05
K3:	-0.0377453	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Figura 8: Valores de calibración de la cámara.

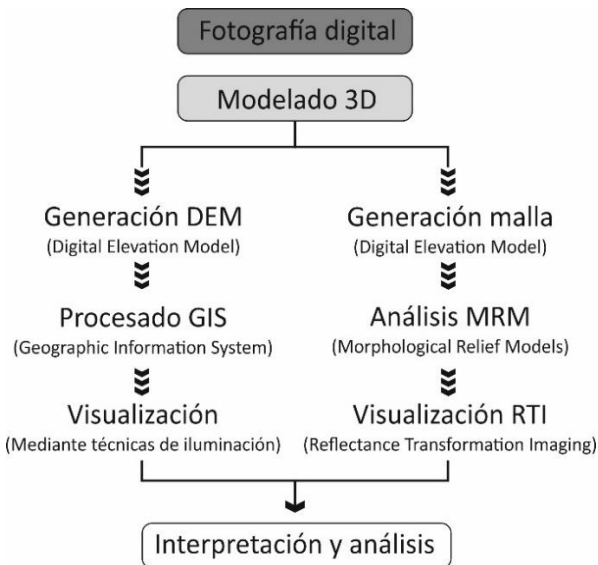


Figura 5: Metodología de trabajo empleada.

Para generar el MDE se requiere la introducción de un mínimo de 3 puntos con sus coordenadas relativas. Estos datos los obtenemos a partir de las barras de escala auxiliares con las que se han realizado las fotografías (Fig. 9).

Una vez introducidas las coordenadas, generamos el MDE (Fig. 10), que exportamos como GeoTIFF de tamaño 3256 x 2172 píxeles y de 0.106 mm/pix. A partir de este archivo trabajamos la pieza objeto de estudio como si de una microtopografía se tratase con el SIG, aplicando técnicas de iluminación y análisis geográficos.

Por otro lado, para el flujo de trabajo con el software CloudCompare (versión 2.8.beta) para el estudio de la pieza mediante técnicas MRM o RTI, se exporta la nube de puntos en formato ASCII PTS. En este caso, para una nube de puntos generada a calidad alta, se obtiene un archivo de 2074463 puntos.

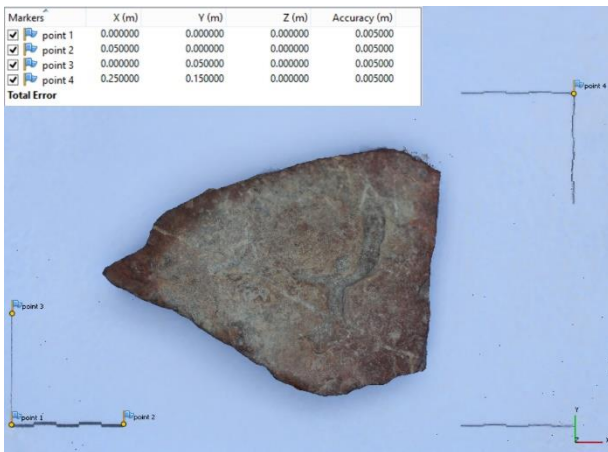


Figura 9: Coordenadas relativas introducidas al modelo.

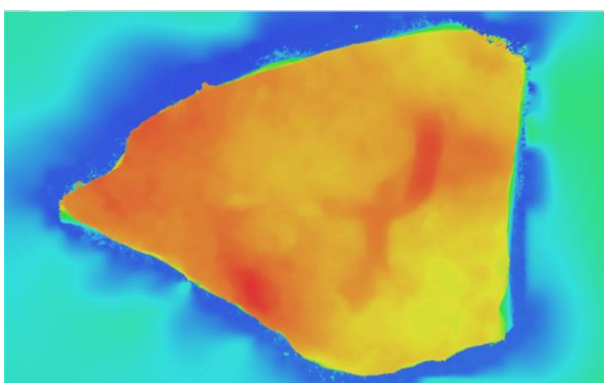


Figura 10: MDE generado de la superficie de la piedra.

4. Visualizaciones de la nube de puntos

La obtención de las nubes de puntos se ha convertido en un método de trabajo esencial en el ámbito del patrimonio cultural y arqueológico (Farjas, Moreno, & García 2011). A partir de ella, y con el manejo de programas informáticos de tratamiento de datos 3D, podemos generar información y visualizaciones mediante diferentes técnicas con las que analizar el objeto de estudio.

Una de estas técnicas, como se mostraba en las metodologías de visualización, es el MRM, que se ha aplicado en la piedra de Fontcalent. Con el programa CloudCompare, podemos ver resaltados los detalles morfológicos de la superficie. La figura antropomorfa es evidente y empieza a intuirse otro elemento que comparte características de resalte positivo/negativo con el antropomorfismo.

Dependiendo del nivel de suavizado de la malla sustractora, el resultado que arroja la técnica MRM varía. La Fig. 11 es el resultado de una malla sustractora más suavizada que el resultado obtenido en la Fig. 12, en la que la malla sustractora tenía mayor nivel de detalle.

Otra técnica de visualización con la que obtenemos resultados significativos para la interpretación y análisis de la piedra es la RTI. CloudCompare dispone de una herramienta tipo RTI virtual con el nombre de P.C.V. Ambient Occlusion. La herramienta se puede aplicar tanto en nube de puntos (Fig. 13), como en malla (Fig. 14).

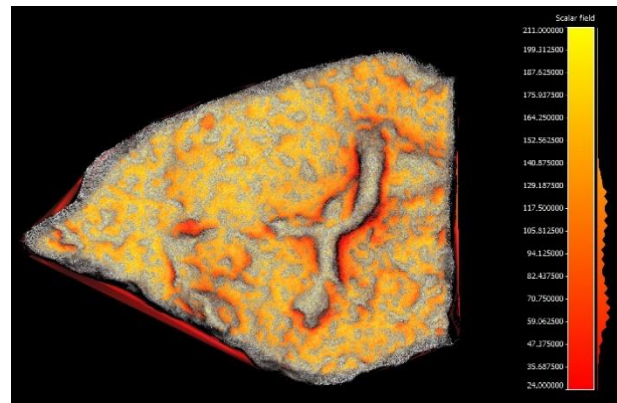


Figura 11: MRM resultado de una malla suavizada.

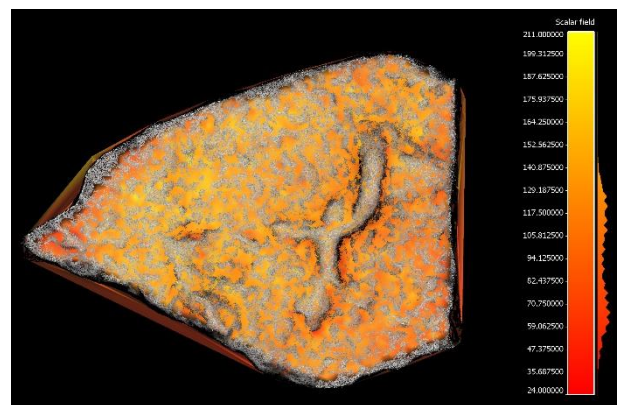


Figura 12: MRM resultado de una malla con menor suavizado.

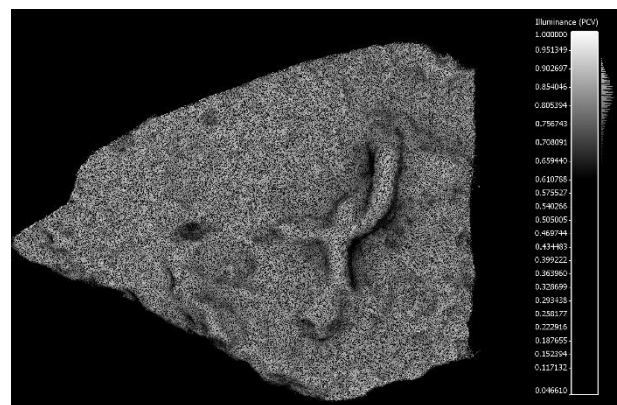


Figura 13: Técnica RTI sobre nube de puntos.

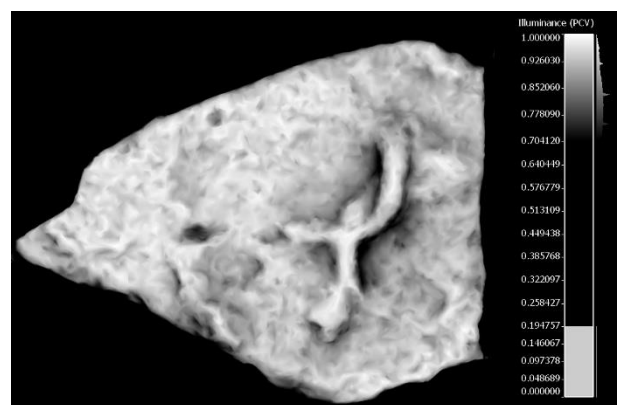


Figura 14: Técnica RTI sobre malla.

Los resultados sobre nube de puntos ofrecen menor detalle de reflejos y sombras que en la malla, pero los resultados son notablemente más precisos, al evitar la simplificación que supone la generación de la malla. En ambas visualizaciones se van definiendo partes de los relieves presentes en la piedra. A esta técnica se le pueden añadir los *shaders Lit Sphere Radiance Scaling* o el *Lambertian Radiance Scaling* que permite MeshLab, pero en este trabajo no se han aplicado.

5. Visualizaciones con herramientas SIG

Las metodologías que se aplican en la documentación y registro de los aspectos morfológicos del paisaje mediante técnicas de registro 3D y herramientas SIG dan como resultado un registro digital, denso y de gran precisión, que permite representar de manera fidedigna su forma y estado. Con los MDE obtenemos un archivo digital, preciso y de calidad que permite una preservación digital del sitio y sobre el que se puede trabajar en el futuro (Mañana-Borrazás, Gianotti, González, & Caramés, 2010).

La aplicación de estas metodologías de trabajo a una escala mayor, como objetos o piezas pequeñas, permite nuevas vías de interpretación sin dañar o alterar el elemento de estudio.

A partir de la documentación mediante fotografía digital y la obtención del modelo 3D con herramientas fotogramétricas automatizadas basadas en SfM generamos el MDE de la pieza objeto de estudio.

Para el flujo de trabajo con las herramientas de análisis geográfico, hemos usado los programas de uso libre QGIS, Saga GIS y la *Relief Visualization Tool (RVT)* que permite aplicar filtros a los datos, buscando contrastes de visualización (Carrero-Pazos *et al.*, 2014).

De este modo, se obtienen las siguientes visualizaciones de la piedra de Fontcalet:

- *Sky-view factor* (Kokalj, Zakšek, & Oštir, 2011): Mediante la aplicación de técnicas de iluminación tipo cielo abierto, con luz difusa por radiación hemisférica. Basada en la proporción de luz que recibe una superficie plana, de modo que las superficies elevadas quedan más iluminadas y las profundas en sombra (Fig. 15).

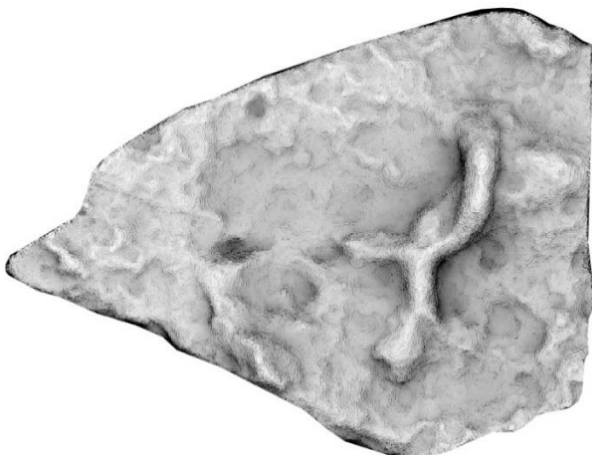


Figura 15: Visualización *sky-view factor*.

- *MDE + hillshading*: Se trata de una iluminación direccional del modelo de terreno a modo de radiación solar por lo que genera una sensación de profundidad con las sombras proyectadas (Fig. 16).
- *Hillshading + Laplace*: A las características de iluminación y sombras proyectadas del *hillshading*, le aplicamos un filtro laplaciano que permite la detección y resalte de aristas (Fig. 17).
- *Hillshading + high pass*: A las características de iluminación y sombras proyectadas del *hillshading* se añade un filtro *resampling* gracias a la RVT que añade un mapa de colores que remarca las superficies positivas en azul y negativas en rojo (Fig. 18).

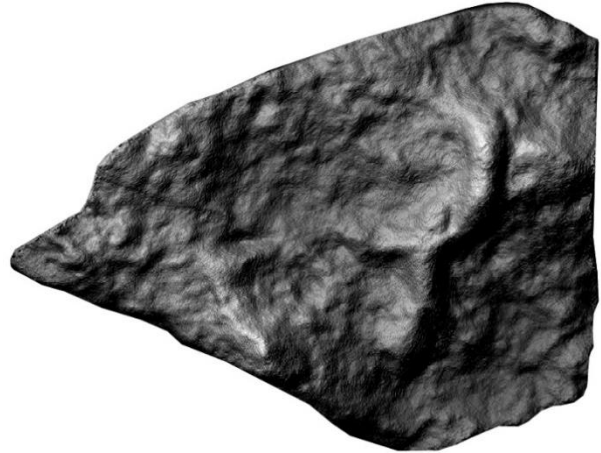


Figura 16: Visualización de MDE + *hillshading*.

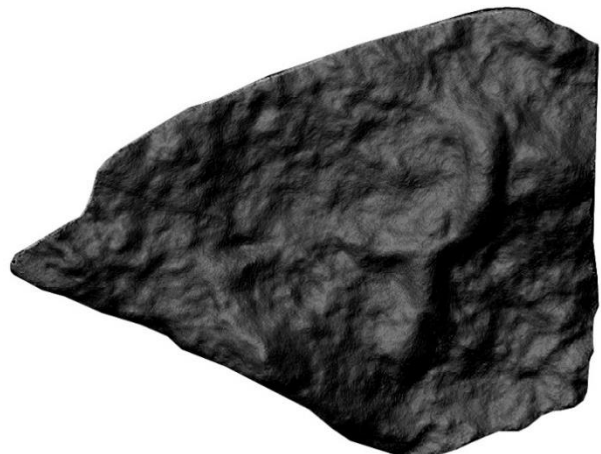


Figura 17: Visualización *hillshading + Laplace*.

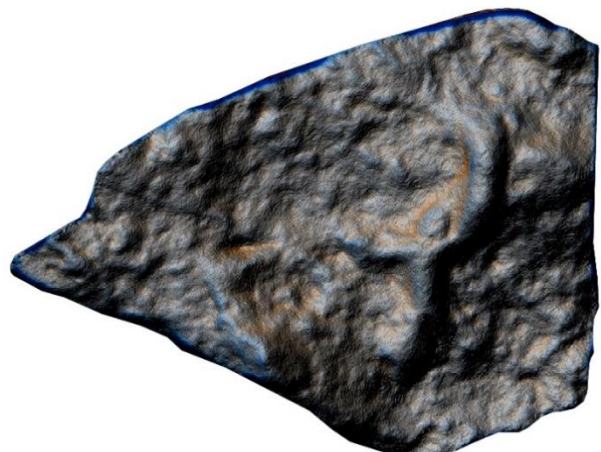


Figura 18: Visualización *hillshading + high pass*.

6. Resultados y conclusiones

Realizadas las visualizaciones con las distintas técnicas mostradas sobre la piedra de Fontcalent, se obtiene una composición formada por tres elementos característicos. Al antropomorfo que despierta el interés por el estudio de la piedra (Fig. 19a), se une una figura que es resultado de las distintas visualizaciones aplicadas y que podría asemejarse a un zoomorfo (Fig. 19b). El uso de las técnicas de visualización recogidas en este estudio ha sido fundamental para llegar a reconocer tal elemento. Por último, en la composición aparece una línea en zigzag (Fig. 19c) que ya se apreciaba de forma visual antes del estudio, pero que resulta interesante comprobar que las visualizaciones basadas en técnicas SIG consiguen resaltarla a pesar de ser incisiones superficiales de poca profundidad. En cambio las visualizaciones basadas en la nube de puntos mediante técnicas MRM o RTI, no llegan a resaltar las características de la línea en zigzag.

El objeto de este artículo es mostrar una metodología de trabajo respetuosa con el patrimonio cultural al no emplear herramientas que puedan alterar o dañar el elemento de estudio. Además ofrece resultados objetivos y de gran calidad que gracias a la generación de productos digitales, permite que se puedan compartir con la comunidad científica para su estudio. Este tipo de metodologías y herramientas digitales permiten reestudiar, revisar y por tanto revalorizar el patrimonio estudiado con técnicas tradicionales, ofreciendo sin lugar a dudas nuevas lecturas o interpretaciones con una nueva puesta en valor del patrimonio.

En cuanto al origen de las figuras que aparecen en la piedra de Fontcalent surgen dos hipótesis de trabajo que habría que desarrollar, como son el posible origen

antropológico posiblemente vinculado al Calcolítico y relacionado con la *Cova del Fum*, dentro del contexto arqueológico en el que aparece. O por otro lado, tratarse de formaciones geológicas naturales formadas por icnofósiles generando estructuras de bioturbación (Zoophycos y Thalassinoides), de las que no hay referencias publicadas para la Sierra de Fontcalent, pero sí a 20 km en la cercana sierra de Agost (Rodríguez-Tovar & Uchman, 2004).

7. Discusión metodológica y perspectivas

La digitalización del patrimonio cultural con las diversas herramientas de digitalización 3D, como es el caso de la fotogrametría automatizada, debería ser una necesidad preceptiva a la hora de afrontar su estudio, análisis o intervención. Las nuevas tecnologías aportan herramientas muy potentes y precisas con las que además evitamos alterar, modificar o dañar los elementos a estudiar al tratarse de técnicas no invasivas. La digitalización del patrimonio es esencial para su conservación y puesta en valor, ya que nos permite tener una copia de alta precisión de elementos que en muchas ocasiones se encuentran expuestos a procesos de deterioro irreversible. Disponer de un patrimonio digitalizado nos permitirá continuar su estudio con el desarrollo de programas y herramientas digitales que sin duda están por venir. Las técnicas de visualización mostradas y experimentadas con la piedra de Fontcalent arrojan resultados interesantes y que nos permiten confirmar la validez de estas metodologías en objetos tan pequeños, por lo que podemos afirmar que a la hora de estudiar y analizar un paisaje, superficie u objeto, más importante que su escala, es la precisión y la calidad en la toma de datos. Hasta ahora, los trabajos publicados por otros equipos de investigación con estas

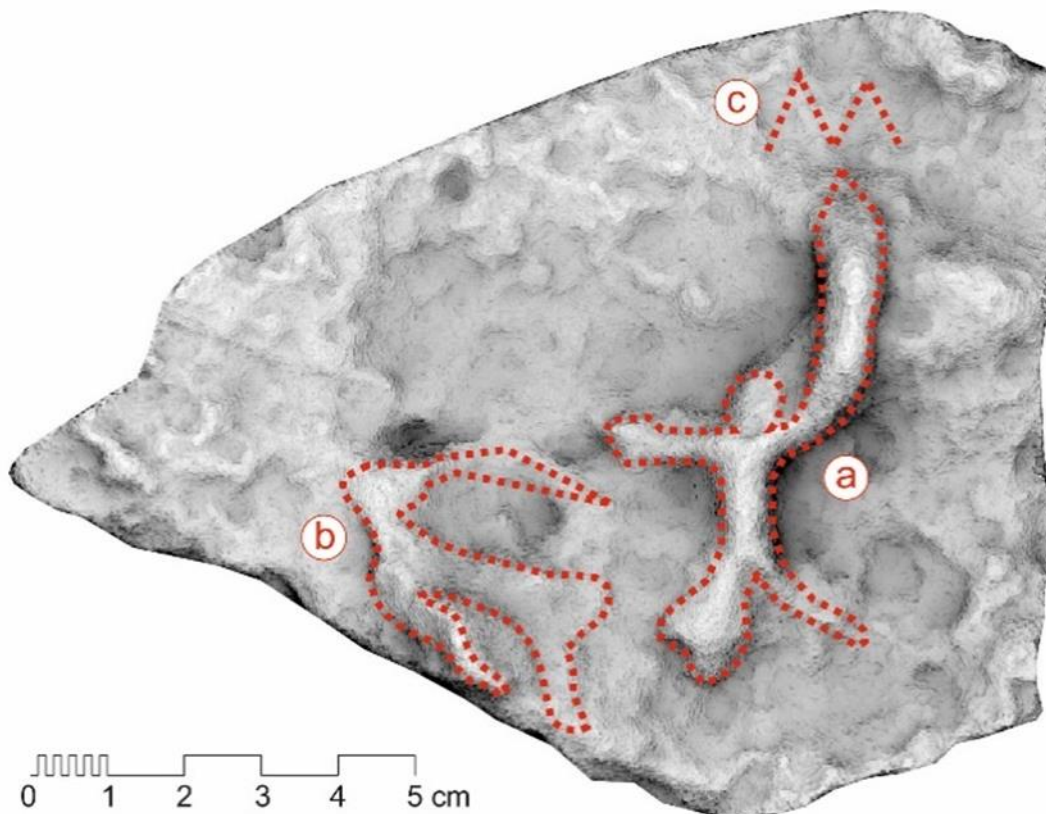


Figura 19: Elementos singulares que aparecen en la piedra.

metodologías son escasos. Los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas arrojan información parcial sobre la superficie estudiada, al revelar detalles sutiles imperceptibles a simple vista. Según la técnica de visualización, destacan más unas zonas u otras, por lo que el estudio mediante visualizaciones debe realizarse tras la superposición de las distintas técnicas que van configurando la microtopografía final de la pieza. Según nuestra experiencia con este estudio, la visualización mediante *hillshading* ofrece mayor nivel de detalle 3D que los *sky-view factor*, que ofrecen una visualización más plana, pero en cambio, el *hillshading*, arroja sombras que ocultan otros detalles a diferencia del *sky-view factor* que visualiza iluminada la totalidad de la superficie diferenciado su microtopografía en función de su cota. El uso de *shaders* combinado con el *hillshading*, sobre todo el *high pass*, mejora la visualización en las zonas en sombra. Recientes estudios han analizado las diferentes técnicas de visualización en función de las características del terreno con el objetivo de proponer directrices para la elección de una técnica en función del terreno a estudiar y con la finalidad añadida del análisis y extracción de datos automatizado (Mayoral *et al.*, 2017). Por el contrario, como indica en otros estudios, no hay un método automático que represente de forma completa las tallas o relieves de una superficie por lo que es y será necesaria la interpretación de los resultados, la experiencia previa y la investigación específica en cada caso (Carrero-Pazos *et al.*, 2017). Con el estado de

desarrollo actual de las técnicas, hemos comprobado que cada una de ellas aportan características fundamentales en la visualización y sin duda, una línea de trabajo a investigar sería establecer y desarrollar diferentes casuísticas de superficies a estudiar, desde paisajistas hasta pequeños objetos, registrados mediante diferentes métodos de digitalización 3D, y analizar el resultado de cada técnica sobre distintas condiciones superficiales, estableciendo una serie de directrices de actuación. Una especie de guía de buenas prácticas en línea con la recientemente desarrollada por Kokalj & Hesse (2017), para el uso de técnicas de visualización de datos de vuelos LiDAR y que sienta las bases para futuras líneas de investigación.

Por otro lado, la utilidad de los sombreadores y técnicas de iluminación en programas como MeshLab, supone un necesario campo a desarrollar para la documentación y estudio del patrimonio cultural. La mejora de estas herramientas permitirá obtener mejores resultados (Lopez-Menchero *et al.*, 2017). Herramientas como MeshLab, CloudCompare, QuantumGis o SagaGIS entre otras, con sus diferentes *shaders* y *plugins*, todas ellas de código abierto y con equipos de desarrollo detrás, unidas a las guías de buenas prácticas y directrices de actuación, van a coadyuvar un nuevo *statu quo* en el análisis, interpretación y puesta en valor del patrimonio.

Referencias

- Campanaro, D., Landeschi, G., Dell'Unto, N., & Leander Touati, A. (2016). 3D GIS for cultural heritage restoration: A 'white box' workflow. *Journal of Cultural Heritage*, 18, 321–332. doi:10.1016/j.culher.2015.09.006
- Caninas, J., Pires, H., Henriques, F., & Chambino, M. (2016). Rock art in Portugal's border area. *Rock Art Research*, 33(1), 79–88.
- Carrero-Pazos, M., Vilas, B., Romani, E., & Rodríguez, A. (2014). La necrópolis del Monte de Santa Mariña revisitada: aportaciones del Lidar aéreo para la cartografía megalítica de Galicia. *Gallaecia: Revista de Arqueoloxía e Antigüidade*, 33, 39–57.
- Carrero-Pazos, M., Vázquez-Martínez, A., & Vilas-Estévez, B. (2016). AsTrend: Towards a new method for the study of ancient carvings. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 105–119. doi:10.1016/j.jasrep.2016.06.044
- Carrero-Pazos, M., Vilas-Estévez, B., & Vázquez-Martínez, A. (2018). Digital imaging techniques for recording and analysing prehistoric rock art panels in Galicia (NW Iberia). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 8, 35–45. doi:10.1016/j.daach.2017.11.003
- Corrales Álvarez, Á., Bermejo Meléndez, J., & Campos Carrasco, J. (2018). Aplicaciones SIG e infográficas en la Casa Norte del yacimiento arqueológico de Arucci (Aroche, Huelva). *Virtual Archaeology Review*, 9(18), 77–86. doi:10.4995/var.2018.6341
- Correia, M. J., Pires, H., & Sousa, O. (2014). Nuevas lecturas de las inscripciones del santuario de Panóias (Vila Real, Portugal). *Sylloge Epigraphica Barcinonensis (SEBarc)*, 12, 197–224.
- De Reu, J., De Smedt, P., Herremans, D., Van Meirvenne, M., Laloo, P., & De Clercq, W. (2014). On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science*, 41, 251–262. doi:10.1016/j.jas.2013.08.020
- De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., & Cherretté, B. et al. (2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), 110–1121. doi:10.1016/j.jas.2012.08.040
- Diez Castillo, A., Cortell Nicolau, A., García Puchol, O., & Esribá Ruiz, P. (2017). 3D environment for the analysis and virtual reconstruction of the archaeological fieldworks at Cocina Cave (Dos Aguas, Valencia, Spain). *Virtual Archaeology Review*, 8(17), 75–83. doi:10.4995/var.2017.7028

- Farjas, M., Moreno, E., & García Lázaro, F. (2011). La realidad virtual y el análisis científico: De la nube de puntos al documento analítico. *Virtual Archaeology Review*, 2(4), 139–144. doi:10.4995/var.2011.4570
- Fernández-Lozano, J., & Gutiérrez-Alonso, G. (2016). Improving archaeological prospection using localized UAVs assisted photogrammetry: An example from the Roman Gold District of the Eria River Valley (NW Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 509–520. doi:10.1016/j.jasrep.2016.01.007
- Gawior, D., Rutkiewicz, P., Malik, I., & Wistuba, M. (2017). Contribution to understanding the post-mining landscape – Application of airborne LiDAR and historical maps at the example from Silesian Upland (Poland). *AIP Conference Proceedings*, 1906(1), 170017. doi:10.1063/1.5012452
- Guennebaud, G., & Gross, M. (2007). Algebraic point set surfaces. *ACM Transactions On Graphics*, 26(3), 23. doi:10.1145/1276377.1276406
- Gutiérrez Lloret, S. (1988). *Cerámica común paleoandalusí del sur de Alicante, siglos VII-X*. Alicante: Caja de Ahorros Provincial de Alicante.
- Happa, J., Mudge, M., Debattista, K., Artusi, A., Gonçalves, A., & Chalmers, A. (2010). Illuminating the past: state of the art. *Virtual Reality*, 14(3), 155–182. doi:10.1007/s10055-010-0154-x
- Hernández Pérez, M. (1989). La Prehistoria. In F. Moreno Sáez, *Historia de Alicante. Vol. I* (pp. 41–60). Alicante: Ayuntamiento de Alicante.
- Hixon, S., Lipo, C., Hunt, T., & Lee, C. (2017). Using Structure from Motion mapping to record and analyze details of the Colossal Hats (Pukao) of monumental statues on Rapa Nui (Easter Island). *Advances in Archaeological Practice*, 6(1), 42–57. doi:10.1017/aap.2017.28
- Iturbe, A., Cachero, R., Cañal, D., & Martos, A. (2018). Virtual digitization of caves with parietal paleolithic art from Bizkaia. Scientific analysis and dissemination through new visualization techniques. *Virtual Archaeology Review*, 9(18), 57–65. doi:10.4995/var.2018.7579
- Kokalj, Ž., Zakšek, K., & Oštir, K. (2011). Application of sky-view factor for the visualisation of historic landscape features in lidar-derived relief models. *Antiquity*, 85(327), 263–273. doi:10.1017/s0003598x00067594
- Kokalj, Z., & Hesse, R. (2017). *Airborne laser scanning raster data visualization: a guide to good practice*. Ljubljana: Založba ZRC.
- Leret, G., Núñez, A., Colodrón, I., & Martínez del Olmo, W. (1978). Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 871 (Elda). Mapa Geológico de España E. 1:50.000 (MAGNA), Segunda Serie, Primera edición. IGME, Madrid.
- López Lillo, J. (2010). Estructuras de combustión en el entorno de la sierra de Fontcalent (Alacant): un primer acercamiento a su estudio. *Lvcentvm*, (29), 199–216. doi:10.14198/lvcentvm2010.29.12
- López-Menchero Bendicho, V., Marchante Ortega, Á., Vincent, M., Cárdenas Martín-Buitrago, Á., & Onrubia Pintado, J. (2017). Uso combinado de la fotografía digital nocturna y de la fotogrametría en los procesos de documentación de petroglifos: el caso de Alcázar de San Juan (Ciudad Real, España). *Virtual Archaeology Review*, 8(17), 64–74. doi:10.4995/var.2017.6820
- Malzbender, T., Gelb, D., Wolters, H., & Zuckerman, B. (2000). Enhancement of shape perception by surface reflectance transformation. *Hewlett-Packard Technical Report HPL-2000-38*, March 2000.
- Mañana-Borrazás, P., Gianotti García, C., González Insua, F., & Caramés Moreira, V. (2010). Aplicación de tecnologías geoespaciales para la documentación del círculo lítico de Monte Lobeira, Vilanova de Arousa (Pontevedra). *Cuadernos de Estudios Gallegos*, 57(123), 25–52. doi:10.3989/ceg.2010.v57.i123.75
- Mayoral, A., Toumazet, J., Simon, F., Vautier, F., & Peiry, J. (2017). The highest gradient model: A new method for analytical assessment of the efficiency of LiDAR-derived visualization techniques for landform detection and mapping. *Remote Sensing*, 9(12), 120. doi:10.3390/rs9020120
- Miller, G.S.P., 1994. Efficient algorithms for local and global accessibility shading. (1994). In *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM, SIGGRAPH* (pp. 319–326). Orlando.
- Moyes, H., & Montgomery, S. (2016). Mapping ritual landscapes using Lidar. *Advances in Archaeological Practice*, 4(3), 249–267. doi:10.7183/2326-3768.4.3.249
- Mudge, M., Schroer, C., Earl, G., Martinez, K., Pagi, H., & Toler-Franklin, C. et al. (2010). Principles and practices of robust, photography-based digital imaging techniques for museums. *The 11th International Symposium on Virtual reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. doi:10.2312/PE/VAST/VAST10S/111-137

- Pires, H., Gonçalves-Seco, L., Fonte, J., Mañana, P., Parcero-Oubiña, C., Fábrega-Álvarez, P., & Señorán, J. (2015). From point clouds to archaeological evidence: Improving visualization and spatial analysis of 3D data. In *Sensing the Past. Contributions from the ArcLand Conference on Remote Sensing for Archaeology* (pp. 52–53). Bonn, Germany. doi:[10.11588/propylaeumdok.00002513](https://doi.org/10.11588/propylaeumdok.00002513)
- Pires, H., Martínez Rubio, J., & Elorza Arana, A. (2015). Techniques for revealing 3D hidden archeological features: morphological residual models as virtual-polynomial texture maps. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W4, 415–421. doi:[10.5194/isprsarchives-xl-5-w4-415-2015](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-5-w4-415-2015)
- Rodríguez-Tovar, F., & Uchman, A. (2004). Trace fossils after the KT boundary event from the Agost section, SE Spain. *Geological Magazine*, 141(4), 429–440. doi:[10.1017/s0016756804009410](https://doi.org/10.1017/s0016756804009410)
- Vilas-Estévez, B., Vázquez-Martínez, A., & Carrero-Pazos, M. (2017). Going further: (Re)Discovering rock art carvings with photogrammetric techniques in Galicia (North-West Iberian Peninsula). In A. Ippolito, & M. Cigola (Eds.), *Handbook of Research on Emerging Technologies for Digital Preservation and Information Modeling* (pp. 175–200). Hershey, PA: IGI Global. doi:[10.4018/978-1-5225-0680-5.ch008](https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0680-5.ch008)
- Ximénez de Embún, M. (2012). Revisando la transición. El final de la Antigüedad Tardía en el yacimiento de Fontcalet (Alicante). *Marq, arqueología y museos*, 05, 173–186.